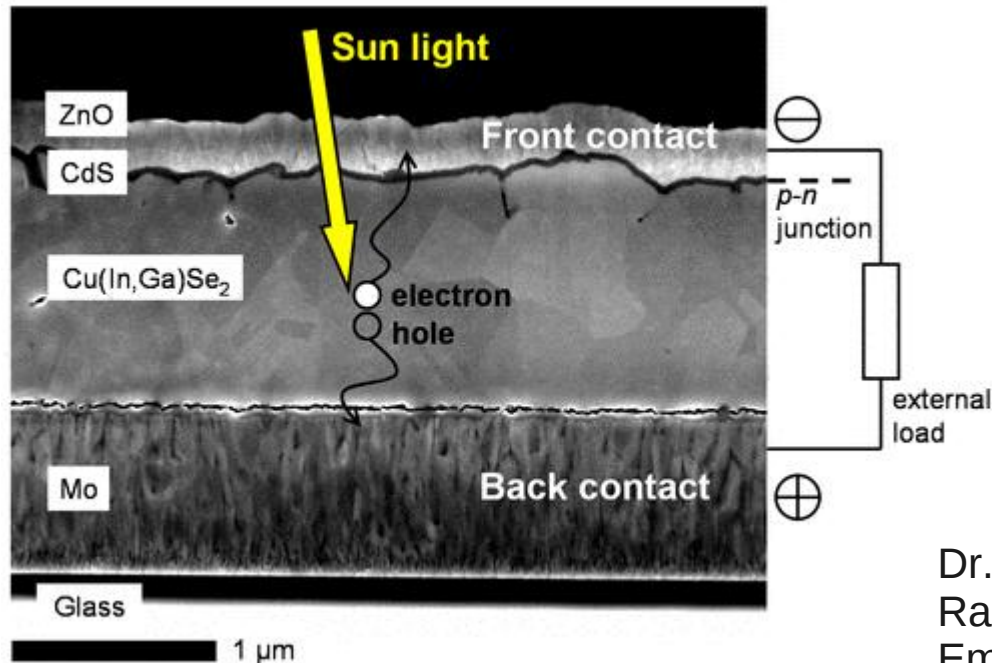
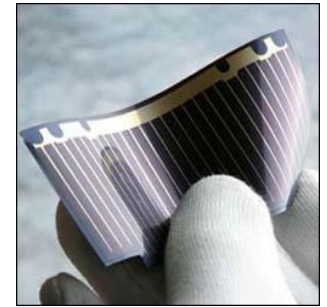
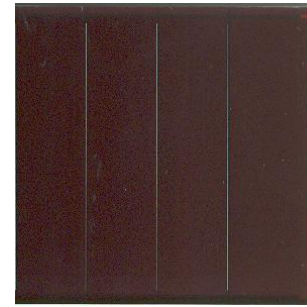


Dye Sensitized Solar Cells (27027-01)

(Dienstag, 10:00-12:00 Departement Physik, Seminarzimmer 3.12)



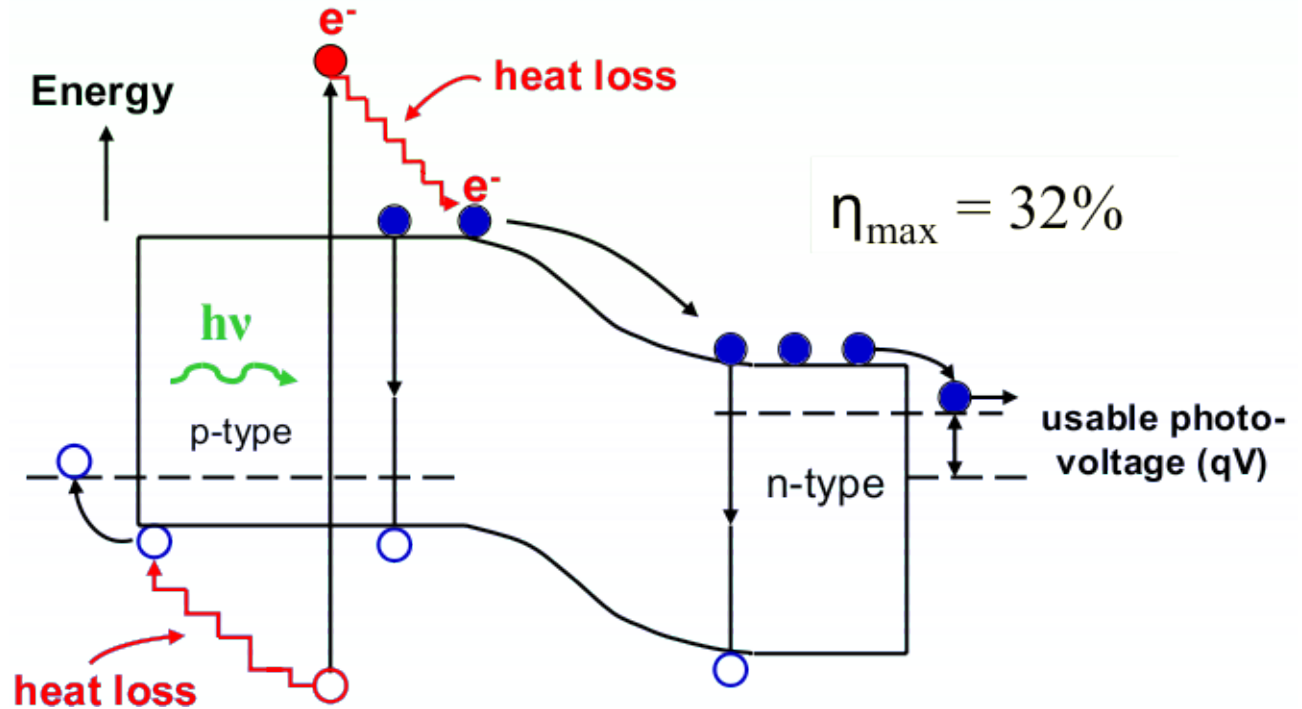
Dr. Thilo Glatzel
 Raum 3.04
 Email: thilo.glatzel@unibas.ch



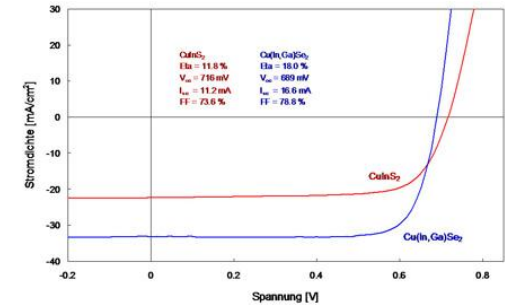
Übersicht der Vorlesung

22.02.2011	allg. Einführung in die Solarenergie
01.03.2011	Physikalische Grundlagen der Photovoltaik I
08.03.2011	Physikalische Grundlagen der Photovoltaik II
15.03.2011	(Fastnachtsferien)
22.03.2011	Photochemische und photoelektrische Methoden der Energiewandlung
29.03.2011	Aufbau der Farbstoffsolarzelle, vgl. org. Solarzelle
05.04.2011	TiO ₂ Nanopartikel als Substrat der Farbstoffsolarzelle
12.04.2011	Geeignete molekulare Farbstoffe zur Sensibilisierung
19.04.2011	Funktionsweise und Alternativen für den Elektrolyten
26.04.2011	(Osterferien)
03.05.2011	(FANAS meeting)
10.05.2011	Experimentelle Methoden zur Solarzellen-Charakterisierung
17.05.2011	Experimentelle Methoden zur Solarzellen-Charakterisierung
24.05.2011	Bau und Charakterisierung eigener Solarzellen
31.05.2011	

Der pn-Halbleiterübergang



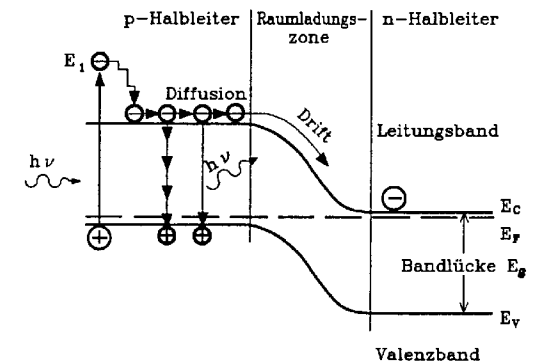
Inhalt - Einführung



- Historischer Rückblick - Photovoltaik und Halbleiter
- Grundlegende Begriffe: FF, η , I_{sc} , V_{oc}
- Strom-Spannungs-Kennlinien
- Sonnenspektrum
- Abschätzung der maximalen Effizienz
- Grundprinzipien der solaren Energiewandlung

Bücher: *The Physics of Solar Cells*, Jenny Nelson, Imperial College Press
Physik der Solarzelle, Peter Würfel, Spektrum Akademischer Verlag
Sonnenenergie: Photovoltaik, A. Götzberger, Teubner Studienbücher
Dye-Sensitized Solar Cells, K. Kalyanasundaram, EPFL Press

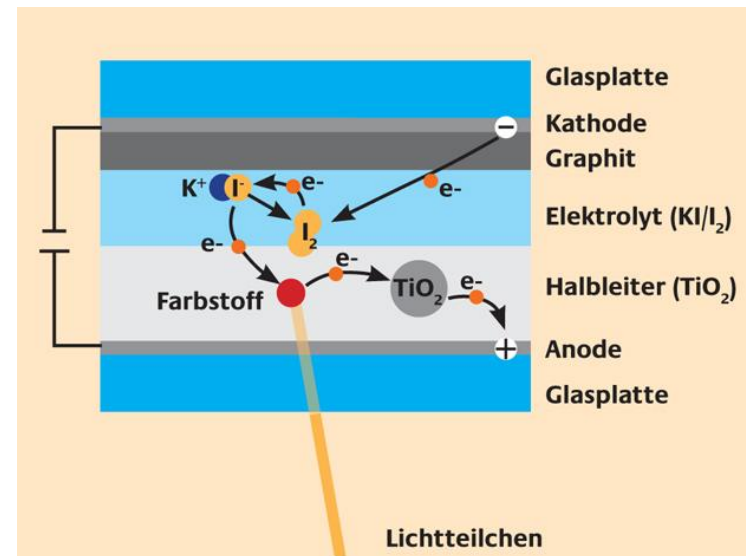
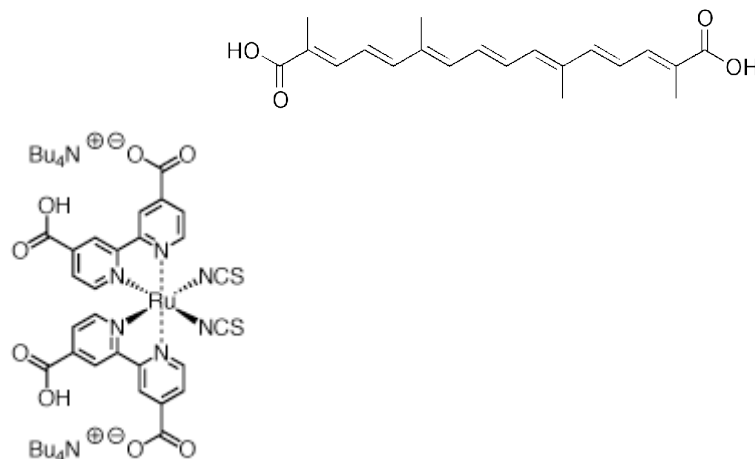
Inhalt – Physik der Solarzelle



- Elektronen und Löcher
- Lichtabsorption
- Halbleiter, Bändermodell, Energielücke, pn-Übergang
- Dunkelstrom, pn-Übergang unter Beleuchtung
- Generation und Rekombination
- Ladungsträgerbeweglichkeit, Driftgeschwindigkeit
- 1 und 2 Dioden-Modell
- Metall-Halbleiterkontakte, Heteroübergänge

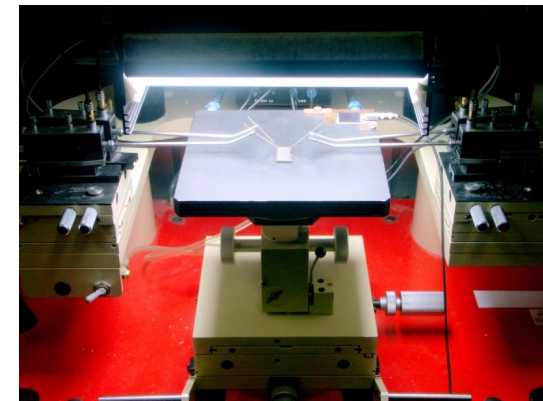
Inhalt – Dye Sensitized Solar Cells

- Photochemie und Photoelektrizität
- Aufbau und Funktionsweise der Grätzel-Zelle
- Einfluss der verschiedenen Komponenten TiO_2 , Elektrolyt und Kathodenmaterial
- Farbstoffe zur Sensibilisierung
- Bau und Test von Solarzellen?



Inhalt – Experimentelle Methoden

- Sonnensimulator, IV(T)-Kennlinien
- Messung der Quantenausbeute (interne und externe)
- Solarzellenherstellung (CVD, PVD, OVPD, Silizium)
- Charakterisierung SPV, PES, Photolumineszenz



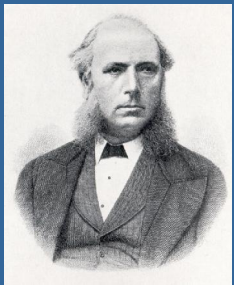
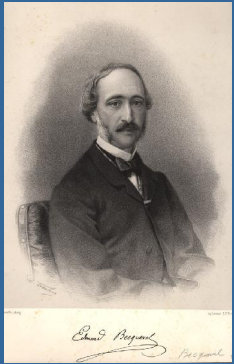
Historische Übersicht

1839: konstruiert der französische Physiker *Alexandre-Edmond Becquerel* das erste photoelektrische Element.

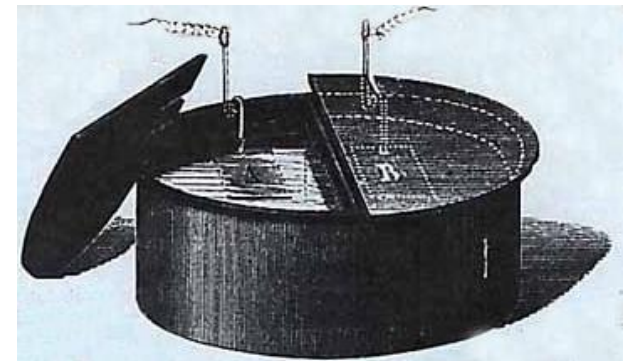
1873: Entdeckt Willoughby Smith eine Änderung der Leitfähigkeit von Selen unter Beleuchtung.

1907: Theoretische Erklärung des licht-elektrischen Effekts durch Albert Einstein.

1954: Calvin Fuller, Gerald Pearson, und Daryl Chapin präsentieren die ersten Siliziumzellen mit einem Wirkungsgrad von 4 - 6 % in den amerikanischen Bell Laboratories.



Bell Solarzellen



Becquerel Experiment



Patent: Light Sensitive Electric Device

Patented June 25, 1946

2,402,662

UNITED STATES PATENT OFFICE

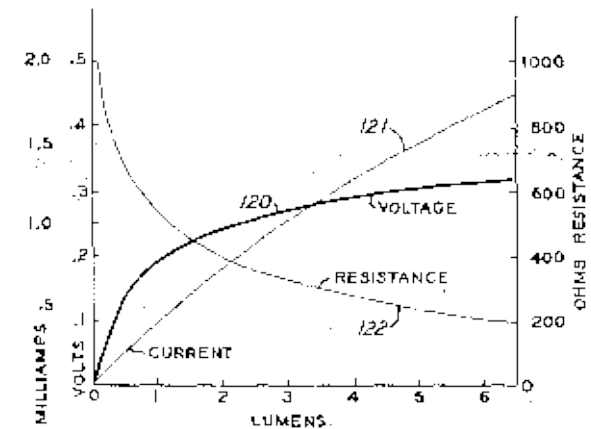
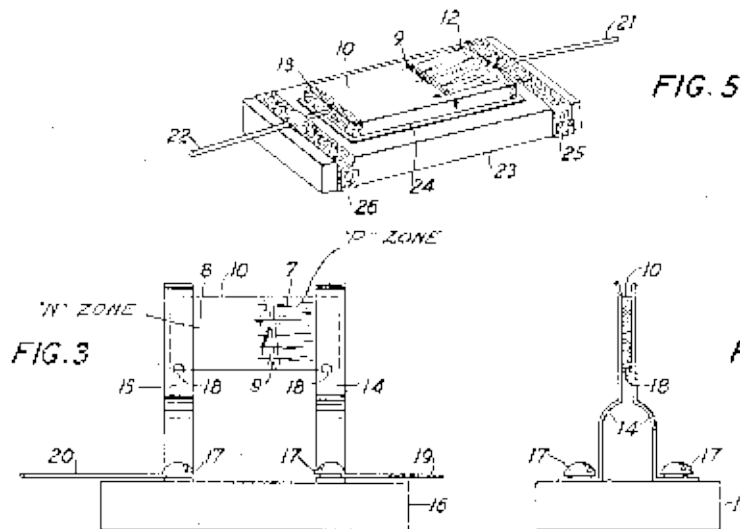
2,402,662

LIGHT-SENSITIVE ELECTRIC DEVICE

Russell S. Ohl, Little Silver, N. J., assignor to Bell Telephone Laboratories, Incorporated, New York, N. Y., a corporation of New York

Application May 27, 1941, Serial No. 395,410

24 Claims. (Cl. 136-89)



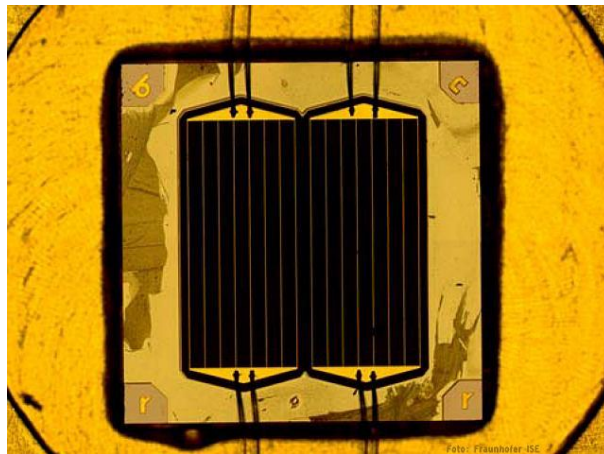
Historische Übersicht

1958 Vanguard I, der zweite Satellit der USA, flog mit einer Photovoltaikanlage ins All.

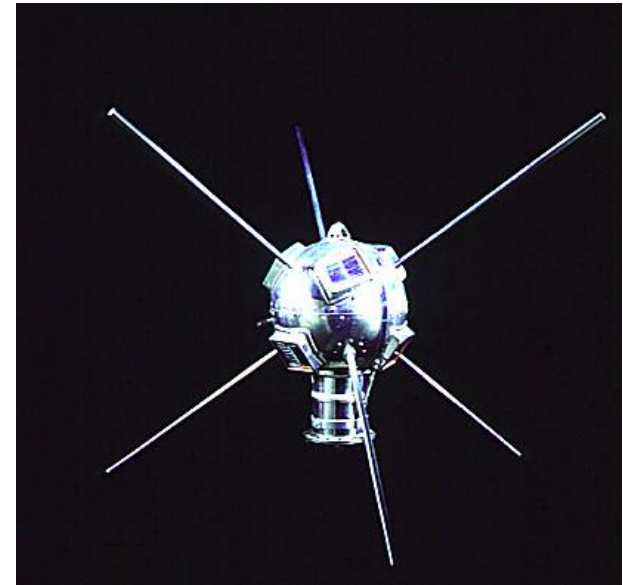
1970's: Die Ölkrise steigert sehr stark das Interesse an der Solarenergie!

1983: 50.000.000 Taschenrechner verwenden amorphe Silizium Solarzellen

2000: Kleine Solarzellen erreichen 30% Wirkungsgrad

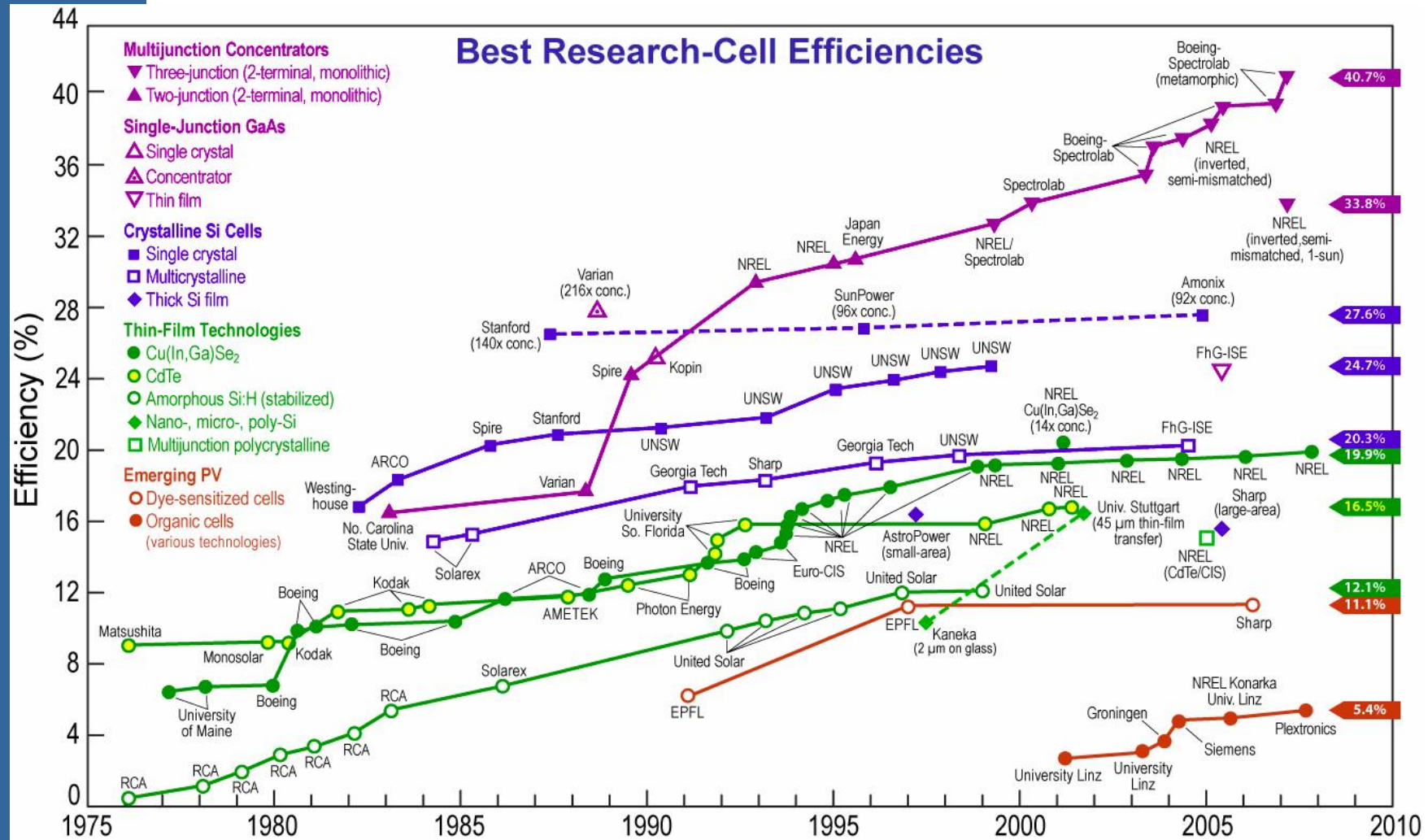


Fraunhofer-ISE: Wirkungsgrad von 41,1% bei 454-fachen Konzentrierung auf eine 5mm² große III-V-Halbleitern GaInP/GaInAs/Ge Mehrfachsolarzelle.

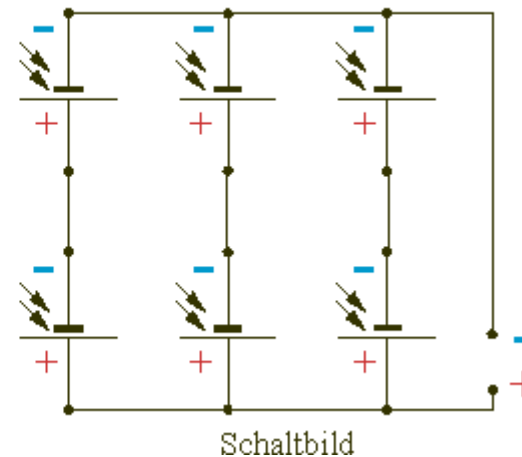
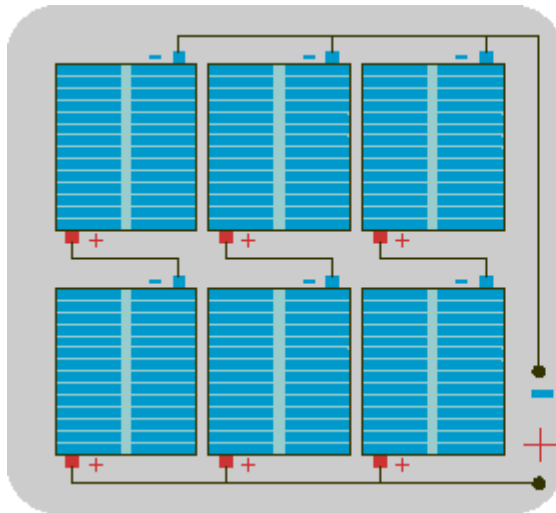




Wirkungsgrad Rekorde



Solarmodule



- Eine einzelne Solarzelle liefert je nach Fläche mehrere 100 mA Strom bei einer Spannung von 0.5-0.6V.
- In einem Modul sind 28-36 Solarzellen in Serie geschaltet um geeignete Spannungen (typisch 12V) zu erhalten.
- Durch die Parallelschaltung sogenannter Schutzdioden können defekte Dioden im Schadensfall "überbrückt" werden.

Grundlegende Definitionen

Offene Klemmspannung V_{oc}

Kurzschlussstrom I_{sc}

Elektrische Last R_L

$I(V)$ durch Strom-Spannungs-Kennlinie

Stromdichte J_{sc}

$$V = IR_L$$

$$I \propto A$$

Vergleich: Solarzelle – Batterie

- Batterie ist Spannungsquelle
- Solarzelle ist Stromquelle

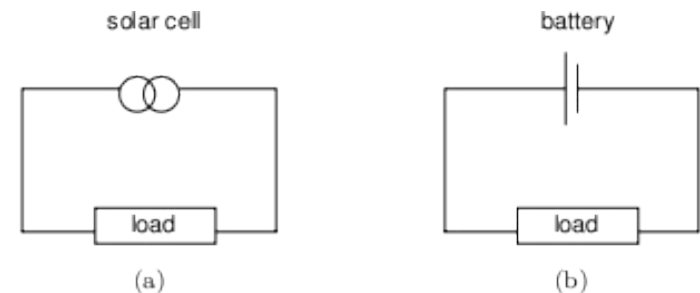
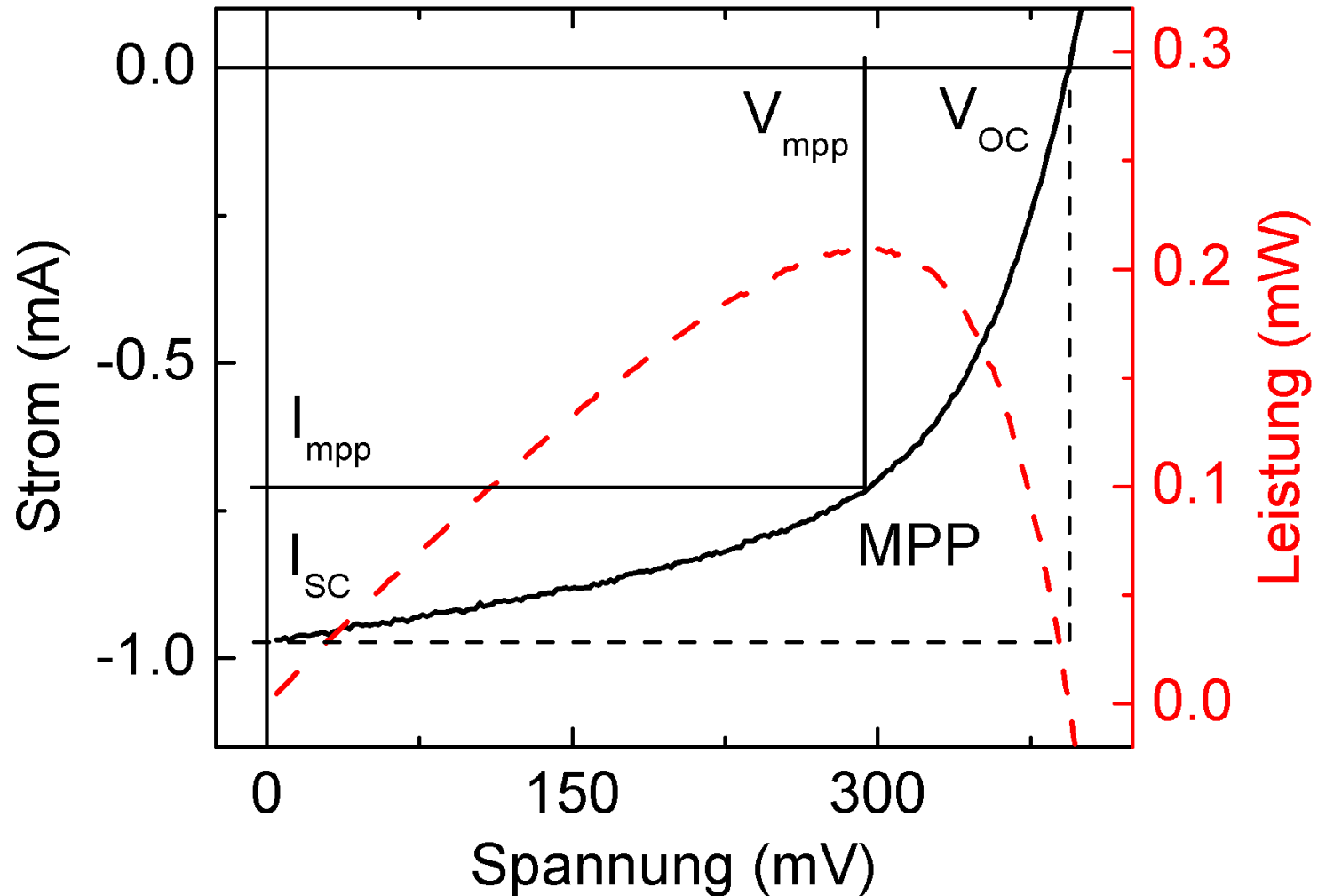


Fig. 1.3. The solar cell may replace a battery in a simple circuit.

Strom-Spannungs-Kennlinie

Strom-Spannungs-Kennlinie einer Farbstoffsolarzelle



Füllfaktor

Offene Klemmspannung V_{oc} bei $I=0$

Kurzschlussstrom I_{sc} bei $V=0$

Der Füllfaktor ist definiert als Quotient aus:

$$FF = \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{J_{SC} V_{OC}}$$

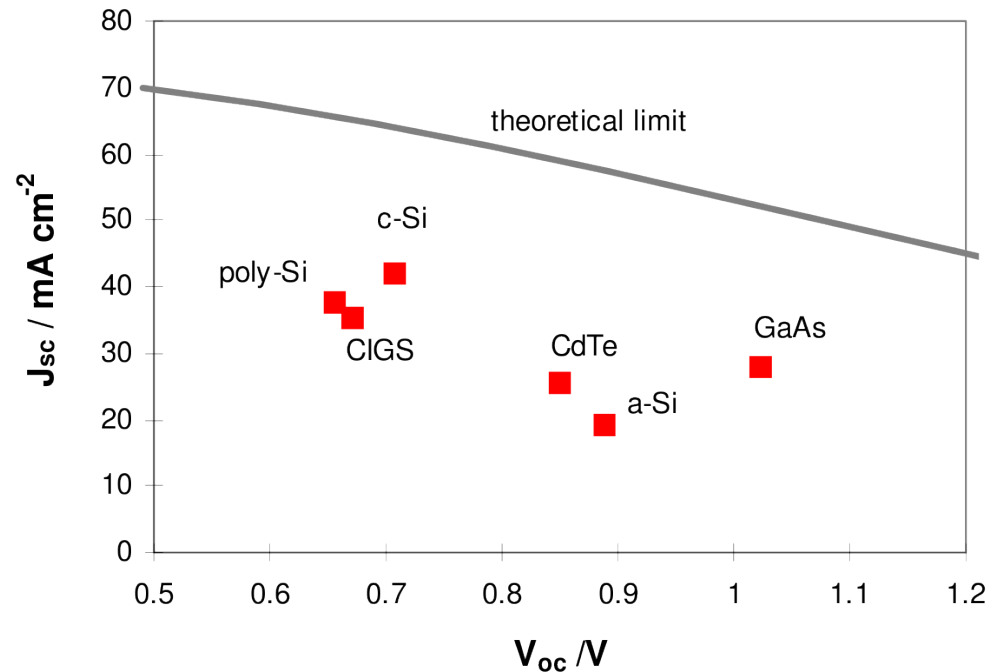
Er gibt die Rechteckigkeit der IV-Kennlinie an, und ist daher ein Mass für die Qualität der Solarzelle.

Typische Werte liegen im Bereich von 50-80%

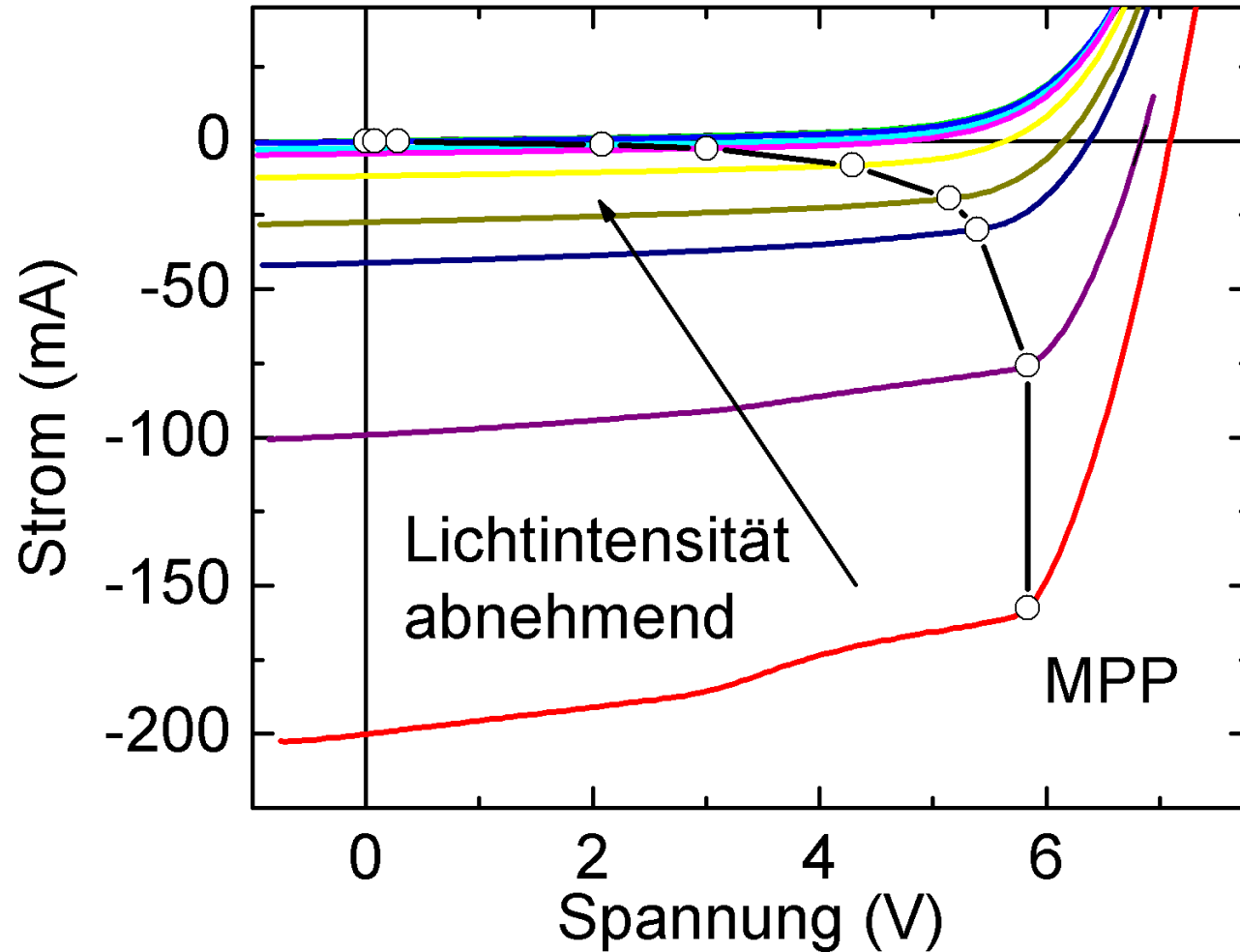
Typische Werte für Solarzellen

Table 1.1. Performance of some types of PV cell [Green *et al.*, 2001].

Cell Type	Area (cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	Efficiency (%)
crystalline Si	4.0	0.706	42.2	82.8	24.7
crystalline GaAs	3.9	1.022	28.2	87.1	25.1
poly-Si	1.1	0.654	38.1	79.5	19.8
a-Si	1.0	0.887	19.4	74.1	12.7
CuInGaSe ₂	1.0	0.669	35.7	77.0	18.4
CdTe	1.1	0.848	25.9	74.5	16.4



Einfluss der Lichtintensität



Photostrom und Quanteneffizienz

Um die Stromdichte J_{SC} mit dem einfallenden Lichtspektrum in Zusammenhang zu bringen benötigt man die Quanteneffizienz $QE(E)$ der Solarzelle.

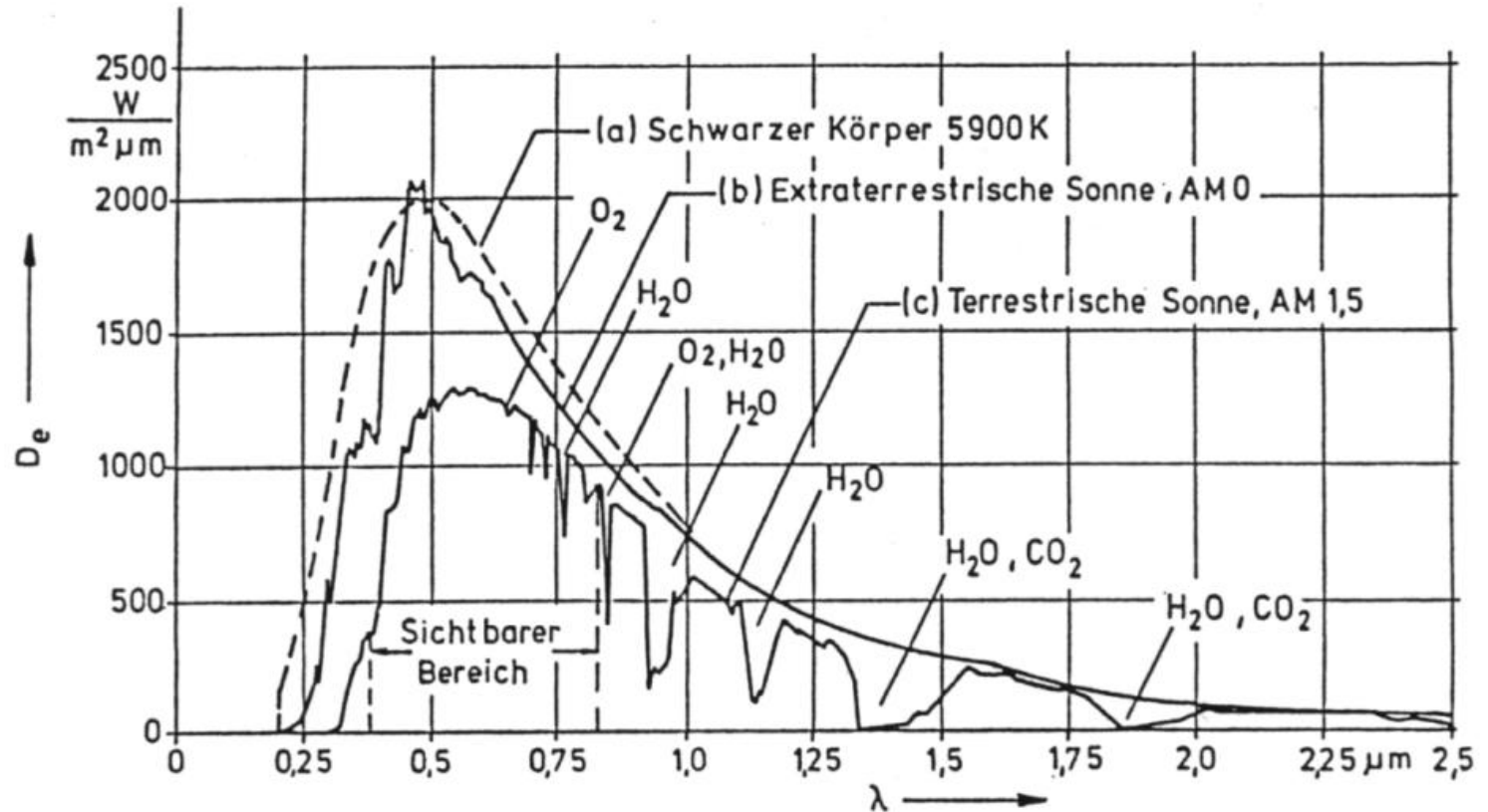
$QE(E)$ ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein eintreffendes Photon mit der Energie $E=hc/\lambda$ ein Elektron zum externen Kreislauf beiträgt.

$$J_{SC} = q \int b_S(E) QE(E) dE$$

b_S : einfallende spektrale Photonendichte. QE ist abhängig von:

- Absorptionskoeffizient vom Solarzellenmaterial
- Effektivität der Ladungstrennung
- Leitungsverluste der Solarzelle

Sonnenspektrum



AM0: Spektrale Energiedichte ausserhalb der Atmosphäre senkrecht zur Sonne, 1367 W/m^2 (Solarkonstante)

AM1.5: Spektrale Energiedichte auf der Erde mit einem Winkel von 48° zur Sonne, ohne Wolken! ($\sim 100 \text{ mW/cm}^2$, bei 25°C)

Sonneneinstrahlung

Das *AM* (Air Mass) Spektrum ist definiert als die Luftschicht die das Licht durchdringen muss. In erster Näherung kann man schreiben:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

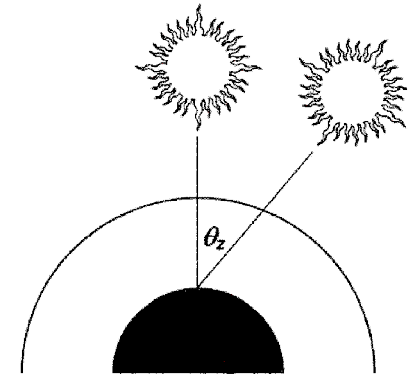


Figure 1.4. The amount of atmosphere (air mass) through which radiation from the sun must pass to reach the earth's surface depends on the sun's position.

Der *AM*-Wert kann durch eine einfache experimentelle Abschätzung bestimmt werden:

$$AM = \sqrt{1 + (s/h)^2}$$

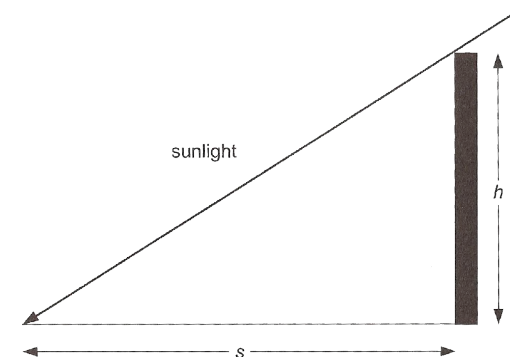
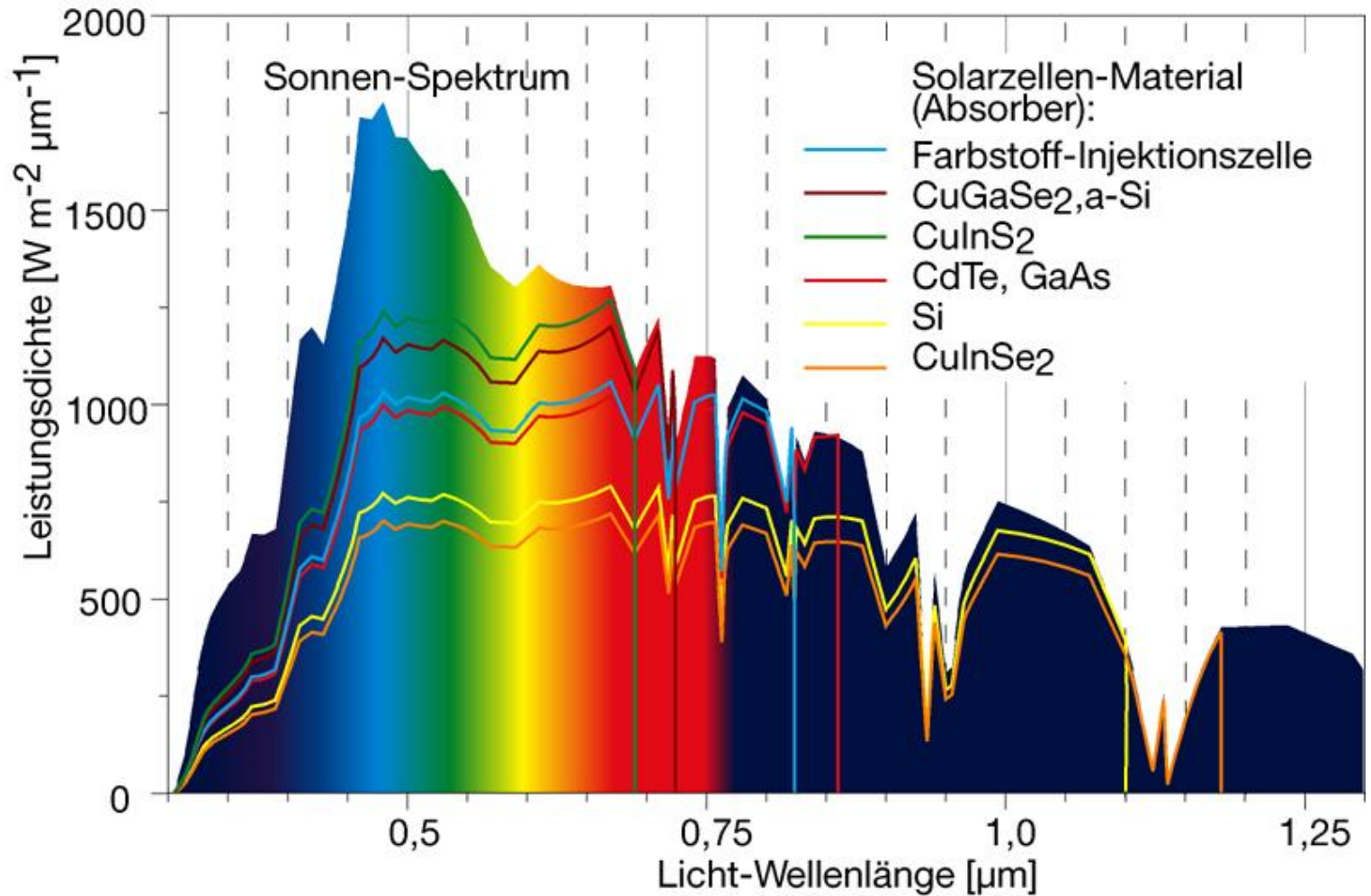


Figure 1.5. Calculation of Air Mass using the shadow of an object of known height.

Quanteneffizienz



Charakterisierung einer Solarzelle

Messung einer IV-Kennlinie im Sonnensimulator:

Ideale Diodengleichung:

$$J_{dark}(V) = J_0(e^{qV/k_B T} - 1)$$

Daraus ergibt sich die Strom-Spannungs-Charakteristik einer beleuchteten Solarzelle zu:

$$J(V) = J_0(e^{qV/k_B T} - 1) - J_{Ph}$$

$$\Rightarrow V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{J_{Ph}}{J_0} + 1\right)$$

k_B : Boltzmannkonstante, T : Temperatur, J_{Ph} : Photostrom, J_0 : Sättigungsstrom

1-Diodenmodell

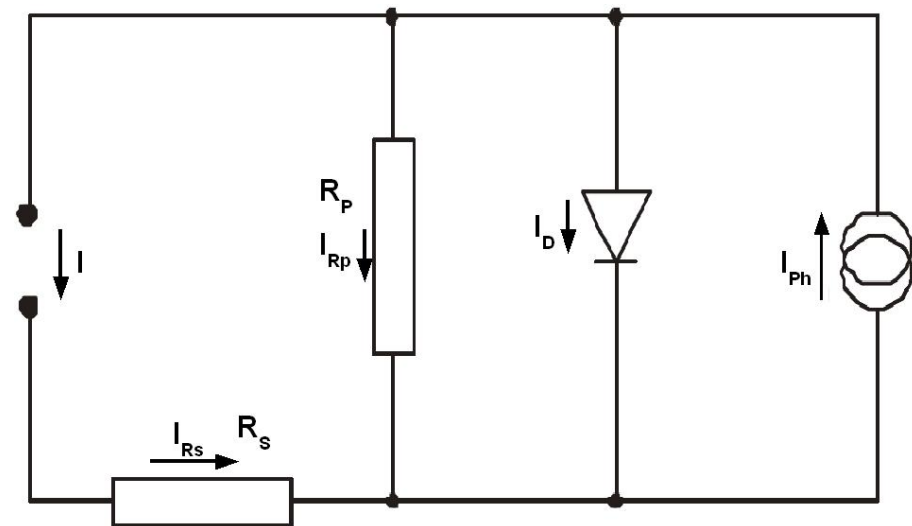
Reale Solarzellen haben elektrische Verluste die mit Hilfe von Serien- und Parallel-Widerständen modelliert werden können:

$$J(V) = J_0 \left(e^{q \frac{V - R_S J}{A k_B T}} - 1 \right) + \frac{V - R_S J}{R_P} - J_{Ph}$$

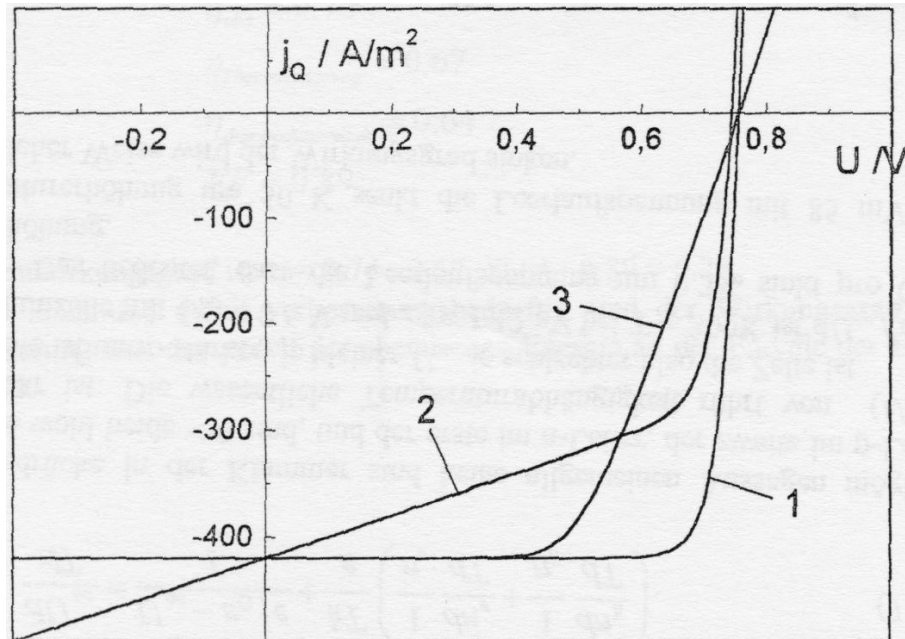
R_S : Serienwiderstand

R_P : Parallelwiderstand

A : Diodenqualitätsfaktor



Einfluss der Verlustströme



1: $R_S = 0 \Omega$, $R_P = 50 \Omega$

2: $R_S = 5 \Omega$, $R_P = \infty$

3: $R_S = 0 \Omega$, $R_P = \infty$

Nicht ideale Werte verringern den Füllfaktor und damit die Effizienz

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η einer Solarzelle gibt das Verhältnis von eingestrahelter und maximal möglich umgesetzter Energie an.

$$\eta = \frac{J_{mpp} V_{mpp}}{P_{Ph}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{Ph}}$$

P_{Ph} ist die eingestrahelte Leistungsdichte des Lichtes.



Paper topics

- **Impact of organic solar cells**
- **Ru-, Cu- complexes**
- **Natural dyes**
- **TiO₂ nano-structuring**
- **Adaptation of the electrolyte**
- **Physical models, numerical simulation**
- **Historic development**
-

Übungsaufgaben

1. Die Sonne steht in einem Winkel von $60^\circ / 30^\circ$ über dem Horizont, welchen AM -Werte sollte man dort berücksichtigen?
2. Wie lang ist der Schatten einer Säule mit einer Höhe von 1m unter $AM1.5$ Beleuchtung?
3. Eine pn-Solarzelle hat eine offene Klemmspannung von $V_{OC}=0.5V$ und einen Kurzschlussstromdichte von $J_{SC}=20mA/cm^2$. Eine zweite Solarzelle hat die Kenngrößen $V_{OC}=0.6V$ und $J_{SC}=15mA/cm^2$. Beide Solarzellen sollen sich wie ideale Dioden verhalten welche Werte bekommt man für V_{OC} und J_{SC} wenn die Zellen (a) parallel und (b) in Serie verschaltet sind?